МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.75.037-52: 669.15-194.2 10.23947/1992-5980-2018-18-1-50-58

Однопроходная электродуговая сварка под тонким слоем шлака толстолистовых конструкций стали 09Г2С*

Ю. В. Полетаев[1], В. Ю. Полетаев[2]**
[1, 2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

One-pass arc welding under thin slag layer of thick 09G2S steel plate structures ***

Yu. V. Poletaev[1], V. Yu. Poletaev[2]**
[1, 2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена технологии однопроходной электродуговой сварки под тонким слоем шлака (АСТ) толстолистовых сварных конструкций в тепловом и атомном машиностроении. Материал конструкций — сталь 09Г2С. Цель работы — опытным путем установить возможность применения способа АСТ вместо автоматической сварки под флюсом (АСФ) и электрошлаковой сварки (ЭШС) при изготовлении корпусного оборудования энергетических установок.
Материалы и методы. Технология разрабатывалась на основании расчетов теплового режима сварки (параметров термического цикла и режима сварки). Контрольные сварные соединения-пробы толщиной 100 мм были изготовлены из низкоуглеродистой низколегированной стали 09Г2С. Сварка выполнена на аттестованном оборудовании ОАО «ЭМК — Атоммаш». Качество сварных соединений оценивалось по результатам штатного контроля методами: магнитно-порошковой дефектоскопии (МПД), ультразвукового контроля (УЗК) и радиографической дефектоскопии (РГД). Результаты неразрушающего контроля дополняли данными металлографических исследований. Для изучения характера кристаллизации металла шва по длине сварной пробы механическим способом вырезали макротемплеты из середины по толщине и на расстоянии 10 мм от поверхности. В экспериментах использовали: методику и установку «ТЦС-1» для моделирования термического цикла сварки металла зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений; стандартные методы определения механических свойств; показатели твердости и микротвердости; метод определения величины зерна на микрофотографиях по ГОСТ 5639-82. Микроструктуру изучали на оптических микроскопах ММР-2Р и *Reichert* при увеличениях до 1000 крат. Кроме того, с помощью электронного микроскопа ЭМВ-100ЛМ методом реплик были изучены: характер распределения и идентификация вторичных фаз неметаллических включений; сварные образцы и образцы, моделирующие металл ЗТВ на чувствительность к надрезу; стабильность и стойкость структуры против образования трещин при сварке.
Результаты исследования. С учетом результатов теплово-

Introduction. The technology of single-pass arc welding under a thin layer of slag (AST) of thick plate welded structures in the thermal and nuclear engineering is considered. The structure material is 09G2S steel. The work objective is the experimental study on the applicability of the AST method instead of the automatic welding under flux (AWF) and electroslag welding (ESW) under manufacturing the package units of the power plants.
Materials and Methods. The technology is developed on the basis of the calculation results of the thermal welding mode (thermal cycle parameters and welding mode settings). Test joint weld-samples, 100 mm thick, are made of 09G2S low-carbon low-alloy steel. Welding is performed on the certified equipment of "EMC-Atommash" JSC. The welded joints quality is assessed on the standard control results by the following techniques: magnetic-particle testing (MPT), ultrasonic control (USC) and radiographic testing (RT). The non-destructive testing results were supplemented with the metallographic study data. To investigate the nature of the weld metal crystallization along the length of the weld, the macrotemplates were cut out mechanically from the middle through-the-thickness and at the distance of 10 mm from the surface. The technique and installation of "TCS-1" for simulating the thermal cycle of the metal welding of the heat affected zone (HAZ) of the welded joints; standard methods for determining mechanical properties; hardness and microhardness indices; and method for determining the grain size in micrographs according to GOST 5639-82 were used in the experiments. The microstructure was studied with MMP-2P and *Reichert* optical microscopes with increase up to thousandfolds. Besides, the distribution pattern and identification of the second phases of non-metallics; welded samples and samples modeling the HAZ metal for the notch sensitivity; structure stability and welding cracking resistance were studied through the replica technique using the EMV-100LM electron microscope.
Research Results. Based on the thermal calculation results and

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: anclav51@mail.ru, afshor@mail.ru
***The research is done within the frame of the independent R&D.

го расчета и моделирования металла ЗТВ обоснованы оптимальные величины погонной энергии, параметров режима сварки и проведена их экспериментальная проверка. Выполнена оценка качества сварных соединений неразрушающими и разрушающими методами. Установлено влияние способа сварки на структуру, качество и механические свойства сварных соединений.

Обсуждение и заключения. Получены положительные результаты теоретических и экспериментальных исследований. Они свидетельствуют о технологической и экономической эффективности применения способа АСТ (вместо АСФ и ЭШС) при изготовлении сварных соединений толщиной 100 мм из низколегированной стали 09Г2С. Умеренное тепловложение при АСТ позволяет за один проход сформировать сварное соединение с более мелкозернистой структурой и высокими механическими свойствами по сравнению с ЭШС и АСФ. Даны рекомендации по использованию способа АСТ в сварочном производстве.

the HAZ metal modeling, the optimum values of the heat input and welding variables are validated and experimentally verified. The welded joints quality is estimated by the nondestructive and destructive methods. The effect of the welding method on the structure, quality and mechanical properties of the welded joints is established.

Discussion and Conclusions. Positive results of the theoretical and experimental studies are obtained. They indicate the technological and economic efficiency of the AST method application (instead of AWF and ESW) under manufacturing the 100 mm thick welded joints of 09G2S low-alloy steel. Moderate heat input in AST allows for the one-pass forming of a welded joint with better fine-grained structure and higher mechanical characteristics as compared to the ESW and AWF. Recommendations on the use of the AST technique in the welding production are given.

Ключевые слова: способ электродуговой сварки; погонная энергия; термический цикл сварки; сталь 09Г2С; сварное соединение; металлографические исследования; механические свойства.

Keywords: arc welding technique, heat input, welding heat cycle, 09G2S steel, weld joint, metallographic test, mechanical properties.

***Образец для цитирования*:** Полетаев, Ю. В. Однопроходная электродуговая сварка под тонким слоем шлака толстолистовых конструкций стали 09Г2С / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 1. — С. 50−58.

For citation: Yu.V. Poletaev, V.Yu. Poletaev. One-pass arc welding under thin slag layer of thick 09G2S steel plate structures. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.1, pp. 50−58

Введение. При изготовлении толстолистовых сварных конструкций энергетического оборудования из углеродистых и низколегированных сталей широко используют высокопроизводительный способ электрошлаковой сварки (ЭШС). Однако у данной технологии есть ряд ключевых проблем. В частности, при сварке и термической обработке сварных соединений следует решать задачи, связанные со снижением степени перегрева, измельчением структуры, улучшением механических свойств и технологической прочности [1–3]. С целью повышения структурной и химической однородности и механических свойств сварные соединения после ЭШС подвергают обязательной полной термической обработке (нормализации с отпуском) [4]. Способы ЭШС с регулированием термического цикла сварки в ряде случаев оказываются эффективными и обеспечивают требуемые свойства сварных соединений без последующей полной термической обработки. Однако это заметно усложняет технологию производства сварной конструкции и повышает ее себестоимость [5–12]. При этом проблема формирования стабильной структуры, качества и механических свойств сварных соединений при ЭШС остается не до конца решенной.

Целью настоящей работы является разработка технологии и опытно-промышленное опробование способа сварки, альтернативного ЭШС. Речь идет об однопроходной электродуговой сварке под тонким слоем шлака с принудительным формированием металла шва (АСТ) сварных соединений.

Материалы и методы. При экспериментальных исследованиях применяли:

— методику и установку «ТЦС-1» для моделирования металла зоны термического влияния (ЗТВ) по заданному термическому циклу сварки;

— стандартные методы определения механических свойств, твердости и микротвердости сварных соединений;

— метод определения величины зерна на микрофотографиях по ГОСТ 5639-82.

При изучении микроструктуры использованы микроскопы:

— оптические ММР-2Р и *Reichert* при увеличениях до 1000 крат;

— электронный ЭМВ-100ЛМ (метод реплик).

Применение метода реплик преследовало две цели:

— изучение характера распределения и идентификации вторичных фаз неметаллических включений;

— испытание сварных образцов и образцов моделированного металла ЗТВ на чувствительность к надрезу, стабильность структуры и свойств.

Материал — толстолистовая сталь 09Г2С.

Получение оптимальной структуры и свойств металла ЗТВ достигается подбором теплового режима сварки с учетом обоснованного выбора величины погонной энергии процесса (параметров режима сварки).

Погонная энергия $Q_{св}$ и параметры режима сварки рассчитывались с помощью теории тепловых процессов при сварке [13].

На основании результатов металлографических исследований установлена взаимосвязь между погонной энергией и размером зерна металла ЗТВ (рис. 1).

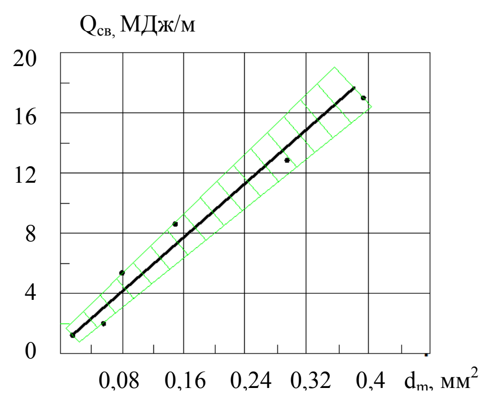


Рис. 1. Влияние погонной энергии при сварке *Qсв* на средний условный диаметр зерна *dm* металла ЗТВ

Fig. 1. Heat output effect under Qsv welding on the average nominal grain diameter dm of HAZ metal

Величина погонной энергии *Qсв* находится в оптимальных пределах 6,27…15 МДж/м. Параметры термического цикла сварки (ТЦС) и соответствующих значений *Qсв* были выбраны по результатам экспериментальных исследований образцов стали 09Г2С с моделированной ЗТВ. Далее параметры ТЦС были уточнены при сварке длинномерных сварных соединений с различной погонной энергией.

Структура металла, характерная для участка перегрева ЗТВ сварных соединений, смоделирована на установке «ТЦС-1». Для этого использовались образцы основного металла размером 12×20×160 мм, которые нагревали проходящим током по режиму выбранного ТЦС. При нагреве до максимальной температуры $Tм = 1420\ ^0C$ формировалась структура, аналогичная структуре участка перегрева ЗТВ производственного сварного соединения. Образцы нагревали до *Tм* с различными скоростями нагрева и охлаждения. Следует отметить широкий интервал времени, в течение которого металл изменялся, подвергаясь температуре выше начала интенсивного роста (НИР) зерна. Данное изменение ($\tau_{НИР}$), температура ($T_{НИР}$), а также диффузные процессы позволили целенаправленно управлять структурной и химической однородностью металла ЗТВ (рис. 2).

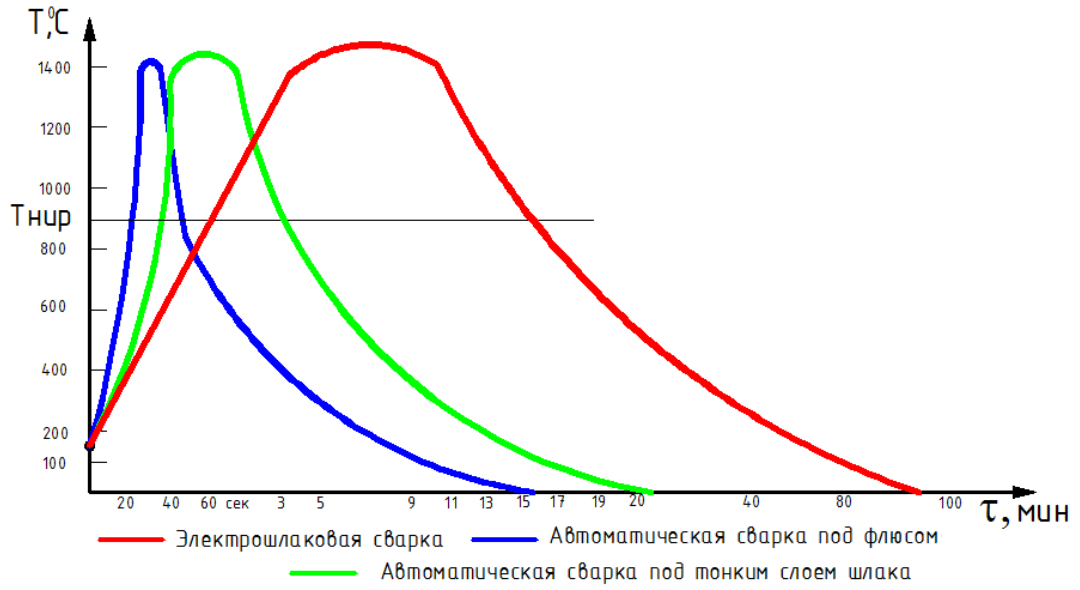


Рис. 2. Влияние способа сварки на параметры термического цикла металла ЗТВ

Fig. 2. Welding technique effect on parameters of HAZ thermal cycle

Скорость охлаждения образцов регулировали путем принудительного или естественного охлаждения. Известно, что размер зерна аустенита металла ЗТВ зависит от *Тм* и $\tau_{НИР}$ и, следовательно, будет иметь наибольшую величину для ТЦС электрошлаковой сварки.

Способ АСТ (рис. 3) сохранил достоинства как дуговой, так и электрошлаковой сварки. За счет дугового процесса обеспечивается значительный разогрев шлаковой ванны, в результате чего увеличивается тепловложение в свариваемые кромки, их качественное проплавление и обеспечивается «мягкий» ТЦС металла ЗТВ.

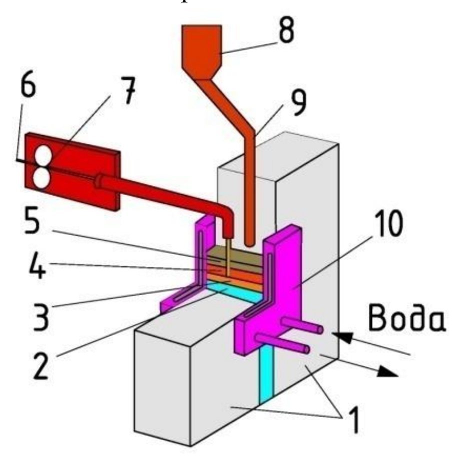


Рис. 3. Принципиальная схема способа АСТ: 1 — свариваемые детали; 2 — металл сварного шва; 3 — сварочная ванна; 4 — жидкий шлак; 5 — слой флюса; 6 — сварочная проволока; 7 — механизм подачи проволоки; 8 — дозатор флюса; 9 — подвод флюса в зону сварки; 10 — медный водоохлаждаемый ползун

Fig. 3. Flowsheet of ACT method: 1 — welded parts; 2 — weld metal; 3 — welding bath; 4 — liquid slag; 5 — flux layer; 6 — welding wire; 7 — wire feeder; 8 — flux feeder; 9 — supply of flux to welding zone; 10 — copper water-coiled dams

С этой целью высоту слоя жидкого шлака, закрывающего сварочную дугу, поддерживают равной ширине сварочного зазора (14–18 мм), что полностью исключает разбрызгивание шлака, обеспечивает стабильность процесса и формирование качественного сварного соединения. Высоту слоя жидкого шлака контролируют и поддерживают с помощью автоматического устройства управления подачей флюса, соблюдая при этом равенство масс подаваемого флюса и расход его на гарнисаж.

Оптимальный сварочный зазор зависит от толщины и длины свариваемых деталей и устанавливается экспериментально. С целью сварки листов большой толщины в зазор одновременно подают две и более электродные проволоки малого диаметра (2 мм), расположенные по оси разделки одна за другой.

Сварка производилась на модернизированной установке *VERTOMATIC-S* фирмы *ARCOS* для ЭШС. Использовался постоянный ток. Мундштуки, ползуны и подающие ролики были предварительно конструктивно доработаны. Это позволило обеспечить:
— подачу проволоки малого диаметра (2 мм) в узкий зазор,
— высокую скорость сварки (до 5 м/ч) и кристаллизации металла шва.

Кроме того, были сформированы мелкозернистая структура и требуемый уровень механических свойств. Установка оснащена устройством контроля высоты слоя жидкого шлака и управления подачей флюса.

Результаты исследования. В производственных условиях «Атоммаша» была применена технология АСТ при сварке пробы со следующими параметрами:
— толщина образца 100 мм (сталь 09Г2С);
— напряжение 36…37 В;
— сила тока 500…550 А;
— диаметр электродной проволоки 2 мм;
— количество проволок 3 шт.;
— марка сварочной проволоки Св. 08Г2С;
— флюс АН-8;
— скорость подачи проволоки 360 м/ч;
— скорость сварки 2 м/ч;
— глубина тонкого слоя шлака 18…22 мм;
— сухой вылет электрода 50 мм;
— температура подогрева — без подогрева.

Сварку проб способами ЭШС и автоматической сварки под флюсом (АСФ) выполнили по штатной технологии.

Изучен характер кристаллизации металла шва по длине пробы. Результаты металлографических исследований показали стабильность размеров металла шва по длине и отсутствие технологических дефектов (рис. 4).

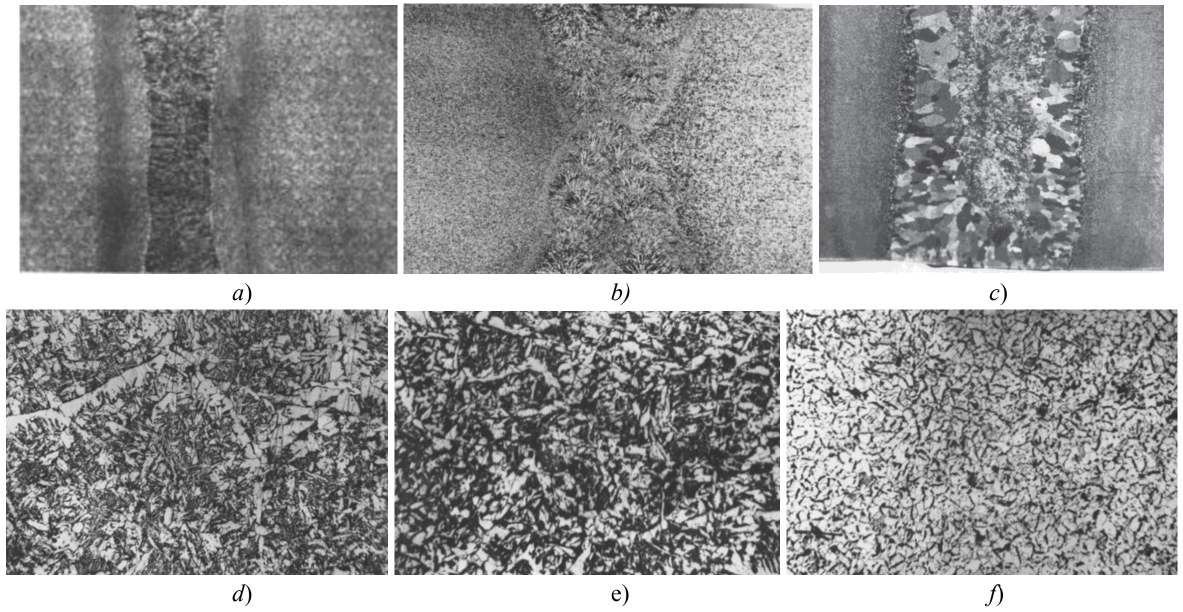


Рис. 4. Макростроение сварного соединения, выполненного способом: АСТ (*a*); АСФ (*b*); ЭШС, ×100; микроструктура сварного соединения, выполненного АСТ (*c*); металл сварного шва (*d*; металл ЗТВ (*e*); основной металл, ×500 (*f*)

Fig. 4. Macrostructure of welded joint made by the method: AST (a); AWF (b); ESW, × 100; and weld joint microstructure made by AST (c); weld metal (d); HAZ metal (e); base metal, × 500 (f)

Ширина сварного шва в средней части составляет 30 мм, что свидетельствует об оптимальном тепловом режиме сварки. Размер столбчатых кристаллов металла шва, полученного способом АСТ (рис. 4, *а*), соизмерим с АСФ (рис. 4, *б*) и имеет несравнимо малую величину в сопоставлении с ЭШС (рис. 4, *в*). Столбчатые кристаллы металла шва (АСТ) образуют с осевой линией угол примерно 45^o. Кристаллы не сращиваются в центре, центральная часть образована равноосными кристаллами, размер которых удобно оценить по микроструктуре (рис. 4, *г*). Структура основного металла — феррит плюс 10 % перлита. Металл зоны термического влияния — феррит плюс бейнит.

Был проведен штатный неразрушающий и разрушающий контроль качества. Результаты подтверждают соответствие качества сварного соединения, выполненного АСТ, нормативно-техническим требованиям [4]. Механические свойства сварных соединений стали 09Г2С, выполненных АСТ, после различных видов термической обработки соответствуют нормативным требованиям (рис. 5, 6).

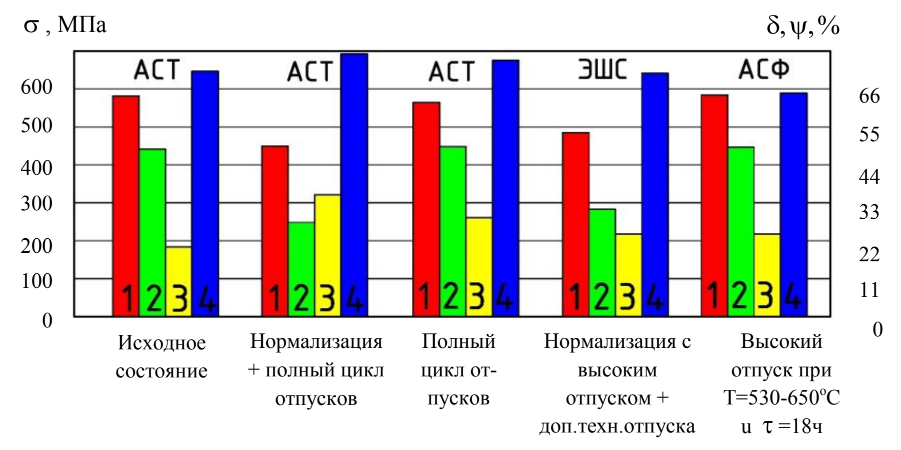


Рис. 5. Влияние способа сварки и термической обработки на механические свойства металла шва: 1 — временное сопротивление разрыву σв; 2 — условный предел текучести σ0,2; 3 — относительное удлинение δ; 4 — относительное сужение ψ

Fig. 5. Effect of welding technique and heat treatment on mechanical properties of weld metal: 1 — ultimate strength σв; 2 —yield strength σ0,2; 3 — elongation δ; 4 —relative reduction ψ

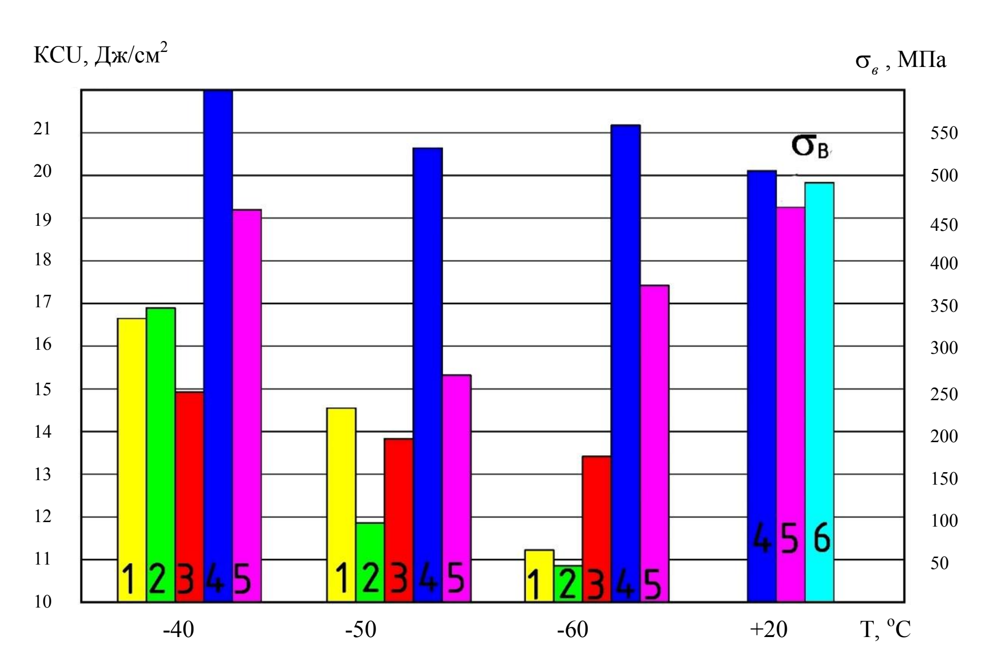


Рис. 6. Влияние термической обработки на ударную вязкость (KCU) при Т = – 40 °С, –50 °С и –60 °С. Металл сварного шва: 1 — исходное состояние; 2 — после высокого отпуска; 3 — после нормализации и высокого отпуска; 4 — после высокого отпуска; 5 — после нормализации и высокого отпуска. Влияние термической обработки на предел прочности $\sigma_в$ сварных соединений стали 09Г2С при Т = 20 °С: 6 — исходное после сварки состояние

Fig. 6. Heat treatment effect on impact strength (KCU) at T = –40 °C, –50 °C, and –60 °C. Weld metal: 1 — initial state, 2 — after high tempering, 3 — after normalization and high tempering, 4 — after high tempering, 5 — after normalization and high tempering. Heat treatment effect on ultimate resistance $\sigma_в$ of weld joints of 09G2S steel at T = 20 °C: 6 — initial state after welding

Обсуждение и заключения. Исследованы сварные соединения низколегированной стали 09Г2С перлитного класса, выполненные способом АСТ и АСФ. Результаты проведенной работы свидетельствуют о том, что после высокого отпуска швы имеют практически одинаковые макро-, микроструктуру и механические свойства. При одинаковой термической обработке сварные соединения АСТ в сравнении с ЭШС имеют более высокие показатели ударной вязкости и заметно меньший размер зерна, с узкой зоной перегретого металла.

Таким образом, тепловой режим АСТ в сочетании с последующим высоким отпуском формирует более мелкозернистую структуру с большим количеством феррита и карбидов $Me_{23}C_6$ по сравнению с ЭШС. Это способствует получению металла ЗТВ оптимальной прочности, с высокой ударной вязкостью и низкой температурой хрупко-вязкого перехода (до $Tк_0$ = –20 °С). Этим можно объяснить высокую технологическую прочность металла сварного соединения, выполненного способом АСТ при сварке и термической обработке сварной конструкции.

В процессе выполнения работы установлены следующие достоинства способа АСТ:
— сварные соединения подвергаются только высокому отпуску;
— высокая скорость сварки (до 5 м/ч);
— технологичность способа и высокое качество сварных соединений;
— минимальные угловые деформации при сварке;
— не требуется механическая обработка кромок под сварку;
— сварка выполняется без предварительного и сопутствующего подогрева;
— малый расход флюса;
— формирование сварных соединений с высокой стойкостью против образования межзеренного разрушения при сварке и термической обработке (отпуске);
— низкие затраты на термическую обработку и последующую механическую обработку сварных соединений от окалины.

Учитывая высокие технико-экономические показатели разработанной технологии (табл.), рекомендуется применять АСТ для изготовления сварных конструкций в энергетическом машиностроении.

Таблица 1
Table 1

Технико-экономические показатели различных способов сварки на 1 пог. м шва сварного соединения

Technical and economic indicators of different welding techniques for 1lim m of weld joint

Способ сварки	Вес напл. металла, кг	Расход эл. энергии, кВт/ч	Скорость сварки, м/ч	Величина зазора, мм	Балл зернистости
АСФ	5,6	56,88	36–38	–	5–6
ЭШС	9,6	26,7	1,0–1,2	28–32	0–(–1)
АСТ	5,2	6,6	4,3–4,9	16–18	4–5

Выводы. В производственных условиях филиала «Атоммаша» АО «АЭМ-Технологии» выполнено опытно-промышленное опробование разработанной технологии однопроходной электродуговой сварки под тонким слоем шлака. Металл шва формировался принудительно в вертикальном положении. Сварные соединения толщиной 100 мм изготавливались из низколегированной стали перлитного класса марки 09Г2С. Проведенные научные изыскания позволяют сделать ряд выводов.

1. Установлено, что у сварных соединений, выполненных АСТ с погонной энергией до 15 МДж/м, формируется благоприятная макроструктура без крупных столбчатых кристаллов. Она имеет минимальную (не более 1 мм) протяженность участка перегретых крупных зерен у зоны сплавления. Дисперсность структуры увеличивается (от ЭШС — к АСТ и АСФ).

2. Показано, что сварные соединения, выполненные АСФ и АСТ, после высокого отпуска характеризуются близкими структурой и механическими свойствами. Однако в связи с загрязненностью шлаковыми и карбонитридными включениями металл шва, полученный способом многопроходной АСФ, имеет в 2 раза меньшую величину ударной вязкости по сравнению с металлом шва пробы АСТ.

3. Электрошлаковые сварные соединения в состоянии после основной термообработки (технологический отпуск + нормализация + высокий отпуск) по сравнению с пробами АСТ (после высокого отпуска) имеют практически одинаковые механические свойства, но пониженную ударную вязкость.

Библиографический список

1. Полетаев, Ю. В. Влияние способа выплавки стали *Cr-Ni-Mo-V* на склонность к межзеренному разрушению при электрошлаковом переплаве / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев // Технология машиностроения. — 2016. — № 8 (170). — С. 5–10.

2. Полетаев, Ю. В. Влияние термического цикла сварки и повторного нагрева на структурно-фазовые изменения низколегированной стали *Cr-Ni-Mo-V* / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 4 (87). — С. 96–103.

3. Полетаев, Ю. В. Влияние надреза на склонность сварных соединений к межзеренному разрушению / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев, Д. В. Рогозин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 15, № 3 (82). — С. 28–34.

4. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. ПН АЭГ-7-009-89 / Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. — Москва : Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, 1989. — 145 с.

5. Полетаев, В. Ю. Способы повышения качества сварных соединений, выполненных электрошлаковой сваркой / В. Ю. Полетаев // Актуальные проблемы науки XXI века : сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф. — Москва ; Санкт-Петербург : Cognitio, 2015. — Ч. 2. — С. 131–139.

6. Полетаев, В. Ю. Влияние химической активности флюса для электрошлаковой сварки на стойкость металла шва против трещин при термической обработке / В. Ю. Полетаев, Ю. В. Полетаев, А. Н. Грицына // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии : сб. ст. VII науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2015. — С. 258–271.

7. Медовар, Б. И. Электрошлаковая технология за рубежом / Б. И. Медовар, А. К. Цикуленко, А. Г. Богаченко. — Киев : Наукова думка, 1982. — 320 с.

8. Brandi, S.-D. Electroslag and electroslag welding / S.-D. Brandi, S. Liu, R.-D. Thomas // AWS Welding handbook. — 2012. — Vol. 6A. — P. 365–379.

9. Компан, Я. Ю. Электрошлаковая сварка и наплавка с управляемыми МГД-процессами / Я. Ю. Компан, Э. В. Щербинин. — Москва : Машиностроение, 1989. — 272 с.

10. Протоковилов, И. В. Управление формированием сварных соединений при ЭШС / И. В. Протоковилов, В. Б. Порохонько // Автоматическая сварка. — 2012. — № 10. — С. 54–59.

11. Krishna, K. Narrow-gap improved electroslag Welding for bridges / K. Krishna // Welding in the World. — 1996. — Vol. 38, № 11. — P. 325–335.

12. Hobeev, A. E. Influence of weld joints Damaging at the Stage of Manufacturing on Operating Reliability / A. E. Hobeev, YU. V. Poletaev // Influence of weld joints damaging at the stage of manufacturing on operating reliability. Material issues in design, manufacturing and operation of nuclear power plants equipment: proceedings of the Seventh international conference. — St. Petersburg : CRISM «Prometey» ; St. Petersburg ONTZ in cooperation with IAEA ; Joint Research Center of European Commission. — 2002. — Vol. 1. — P. 438–447.

13. Кошкарев, Б. Т. Теория сварочных процессов / Б. Т. Кошкарев. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2003. — 217 с.

References

1. Poletaev, Yu.V., Poletaev, V.Yu. Vliyanie sposoba vyplavki stali Cr-Ni-Mo-V na sklonnost' k mezhzerennomu razrusheniyu pri elektroshlakovom pereplave. [Effect of smelting method of Cr-Ni-Mo-V steel on tendency to intercrystalline failure under electroslag remelting.] Tekhnologiya Mashinostroeniya, 2016, no. 8 (170), pp. 5–10 (in Russian).

2. Poletaev, Yu.V., Poletaev, V.Yu. Vliyanie termicheskogo tsikla svarki i povtornogo nagreva na strukturno-fazovye izmeneniya nizkolegirovannoy stali Cr-Ni-Mo-.V [Effect of thermal cycle of welding and reheating on structural-constitutional changes of low-alloyed Cr-Ni-Mo-V steel.] Vestnik of DSTU, 2016, vol. 16, no. 4 (87), pp. 96–103 (in Russian).

3. Poletaev, Yu.V., Poletaev, V.Yu., Rogozin, D.V. Vliyanie nadreza na sklonnost' svarnykh soedineniy k mezhzerennomu razrusheniyu. [Notch effect on the liability of welded joints to intergranular fracture.] Vestnik of DSTU, 2015, vol. 15, no. 3 (82), pp. 28–34 (in Russian).

4. Oborudovanie i truboprovody atomnykh energeticheskikh ustanovok. Svarka i naplavka. Osnovnye polozheniya. PN AEG-7-009-89. [Equipment and pipelines of nuclear power plants. Welding and surfacing. Main principles. PN AEG-7-009-89.] Federal Inspectorate of Russia for Nuclear and Radiation Safety. Moscow: Research and Development Center for Nuclear and Radiation Safety, 1989, 145 p. (in Russian).

5. Poletaev, V.Yu. Sposoby povysheniya kachestva svarnykh soedineniy, vypolnennykh elektroshlakovoy svarkoy. [Ways to improve quality of welded joints made by electroslag welding.] Aktual'nye problemy nauki KhKhI veka: sb. st. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Current problems of science of XXI century: V Int. Sci.-Pract. Conf.: Coll. of papers.] Moscow; St.Petersburg: Cognitio, 2015, part 2, pp. 131–139 (in Russian).

6. Poletaev, V.Yu., Poletaev, Yu.V., Gritsina, A.N. Vliyanie khimicheskoy aktivnosti flyusa dlya elektroshlakovoy svarki na stoykost' metalla shva protiv treshchin pri termicheskoy obrabotke. [Chemical activity effect of flux for electroslag welding on resistance against cracking of the weld metal under heat treatment.] Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii i metallurgii: sb. statey VII nauch.-prakt. konf. [Innovative technologies in machine building and metallurgy: Proc. VII Sci.-Pract. Conf.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2015, pp. 258–271 (in Russian).

7. Medovar, B.I., Tsikulenko, A.K., Bogachenko, A.G. Elektroshlakovaya tekhnologiya za rubezhom. [Electroslag technology abroad.] Kiev: Naukova dumka, 1982, 320 p. (in Russian).

8. Brandi, S.-D., Liu, S., Thomas, R.-D. Electroslag and electroslag welding. AWS Welding handbook, 2012, vol. 6A, pp. 365–379.

9. Kompan, Ya.Yu., Scherbinin, E.VElektroshlakovaya svarka i naplavka s upravlyaemymi MGD-protsessami. [Electroslag welding and surfacing with controlled MHD processes.] Moscow: Mashinostroenie, 1989, 272 p. (in Russian).

10. Protokovilov, I.V., Porohkonko, V.B. Upravlenie formirovaniem svarnykh soedineniy pri EShS. [Control of welded joints formation under ESW.] Avtomaticheskaya Svarka, 2012, no. 10, pp. 54–59 (in Russian).

11. Krishna, K. Narrow-gap improved electroslag. Welding for bridges. Welding in the World, 1996, vol. 38, no. 11, pp. 325–335.

12. Hobeev, A. E., Poletaev, Yu.V. Influence of weld joints damaging at the stage of manufacturing on operating reliability. Material issues in design, manufacturing and operation of nuclear power plants equipment: Proc. 7th Int. Conf. Saint Petersburg, CRISM «Prometey»; St. Petersburg ONTZ in cooperation with IAEA; Joint Research Center of European Commission. 2002, vol. 1, pp. 438–447.

13. Koshkarev, B.T. Teoriya svarochnykh protsessov. [Theory of welding processes.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2003, 217 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 02.09.2017
Сдана в редакцию 02.09.2017
Запланирована в номер 15.01.2018

Received 02.09.2017
Submitted 02.09.2017
Scheduled in the issue 15.01.2018

Об авторах:

Полетаев Юрий Вениаминович,
профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5465-1886
Anclav51@mail.ru

Полетаев Валерий Юрьевич,
старший преподаватель кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3677-7500
afshor@mail.ru

Authors:

Poletaev, Yury V.,
professor of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1), Dr.Sci. (Eng.), Senior Research Scholar,
ORCID: http: //orcid.org/0000-0001-5465-1886
Anclav51@mail.ru

Poletaev, Valery Yu.,
senior lecturer of the Welding Fabrication Machines and Automation Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3677- 7500
afshor@mail.ru